

مطالعه تجربی و تحلیلی تاثیر سرعت جریان بر ناپایداری احتراق در محفظه‌های پیش مخلوط

نوذر اکبری^۱، ناصر سراج مهدیزاده^۲

دانشگاه صنعتی امیر کبیر دانشکده مهندسی هوافضا و قطب علمی مهندسی هوافضای محاسباتی
(a8129982@aut.ac.ir*)

چکیده

احتراق پیش مخلوط با نسبت سوخت به هوای کم برای موتورهای توربین‌گازی در سالهای اخیر به عنوان روشی برای رسیدن به استانداردهای زیست محیطی در رابطه با انتشار NOx بطورگسترده پذیرفته شده است. با این وجود، سیستم‌های احتراقی پیش مخلوط برای تحریک ناپایداری احتراق بسیار مستعد هستند. هدف از این تحقیق بررسی تجربی و تحلیلی تاثیر سرعت جریان ورودی بر نوسانات ایجاد شده در هنگام ناپایداری احتراق پیش مخلوط می‌باشد. برای این منظور در قسمت اول این پژوهش بصورت تجربی تاثیر سرعت جریان مواد اولیه ورودی به محفظه بر دامنه و فرکانس نوسانات ایجاد شده مطالعه شده است. در مطالعه تجربی انجام شده، برای تشخیص ناپایداری محفظه احتراق در شرایط مختلف، از نمودارهای توابع چگالی و منحنی توزیع فضایی نوسانات فشاری استفاده شده است. در قسمت بعد تاثیر سرعت جریان مواد اولیه ورودی بصورت تئوری بر ناپایداری احتراق نیز مورد مطالعه قرار گرفته شده است. نتایج بدست آمده از این کار پژوهشی نشان می‌دهد که در صورت ثابت در نظر گرفتن دبی جرمی ورودی به محفظه احتراق، با افزایش سرعت جریان ورودی به محفظه، در هنگام ناپایداری احتراق دامنه و فرکانس نوسانات ایجاد شده افزایش می‌یابد و این افزایش نوسانات با سرعت جریان ورودی بصورت خطی می‌باشد. دستاوردهای این پژوهش شامل توسعه شناخت تجربی و تحلیل نوسانات فشاری ایجاد شده در هنگام ناپایداری و بررسی دامنه و فرکانس نوسانات فشاری ایجاد شده جهت کنترل بهینه دامنه نوسانات ایجاد شده است.

واژه‌های کلیدی: ناپایداری احتراق - موتورهای توربین‌گازی - محفظه‌های پیش مخلوط - آزمایشات تجربی آکوستیکی

۱- مقدمه

محققین تلاش‌های بسیار زیادی جهت تولید محفظه‌های با NOx کم در موتورهای توربین‌گازی انجام دادند که منجر به استفاده از محفظه‌های جدیدی بنام LPM^۳ گردید. در این نوع محفظه‌ها سوخت و اکسید کننده در لوله پیش مخلوط کاملاً مخلوط می‌شوند و سپس مخلوط سوخت و هوا وارد محفظه احتراق می‌گردد. در این نوع محفظه‌ها دمای احتراق به طور مناسبی کاهش یافته تا از ایجاد NOx حرارتی جلوگیری به عمل آید. احتراق پیش مخلوط با نسبت سوخت به هوای کم برای موتورهای توربین‌گازی در سالهای اخیر به عنوان روشی برای رسیدن به استانداردهای زیست محیطی در رابطه با انتشار NOx بطورگسترده پذیرفته شده است. ولیکن سیستم‌های احتراقی پیش مخلوط با نسبت سوخت به هوای کم برای تحریک ناپایداری احتراق بسیار مستعد هستند [۱].

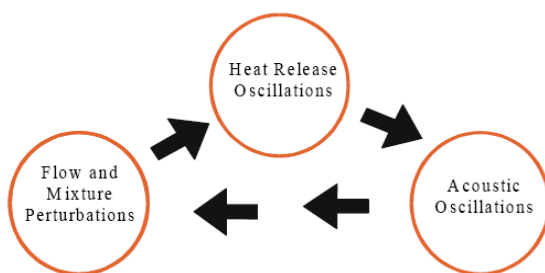
۱- استادیار، دانشگاه هوایی شهید ستاری دانشکده مهندسی هوا فضا

۲- دانشیار، دانشگاه صنعتی امیر کبیر دانشکده هوا فضا، قطب علمی مهندسی هوا فضا محاسباتی

^۳ Lean Pre-Mixed

اغتشاشات فشاری^۱ در یک سیستم محفظه احتراق موتور توربین‌گازی همیشه وجود دارد حتی اگر سیستم عملکرد پایداری داشته باشد. این اغتشاشات در شرایط پایدار معمولاً به صورت نوساناتی با دامنه کم خودشان را نشان می‌دهند که بنام نوسانات آکوستیک کلاسیک معرفی می‌شوند. بطور معمول بعضی از این اختلالات می‌تواند انرژی لازم برای نوسانات ناپایا را مهیا کرده و دامنه آنها را افزایش دهند. نتایج نشان می‌دهد که نوسانات فشاری با دامنه بیشتر از ۵٪ فشار اصلی محفظه احتراق می‌تواند نشان دهنده ناپایداری احتراق در موتورهای توربین‌گازی باشد [۲]. در هنگام ناپایداری احتراق معمولاً دو پدیده مهم زیر اتفاق می‌افتد:

افزایش بیش حد حرارت آزاد شده
نوساناتی فشاری با دامنه بزرگ



شکل ۱- شماتیک مکانیزم ناپایداری احتراق [۳]

با توجه به مطالب فوق ناپایداری ترموآکوستیکی در واقع همگیری بین نوسانات آکوستیک محفظه و نوسانات حرارت آزاد شده ناپایا در محفظه احتراق می‌باشد [۱] (شکل ۱).

هدف از این تحقیق بررسی تجربی و تحلیلی نوسانات ایجاد شده در هنگام ناپایداری احتراق پیش مخلوط و بررسی تاثیر پارامترهای موثر بر این نوسانات می‌باشد. در قسمت اول این تحقیق یک محفظه احتراق پیش مخلوط جهت تست آزمایشگاهی طراحی و ساخته شد، سپس آزمایشات مورد نظر با این محفظه احتراق انجام گرفت. این آزمایشات شامل بررسی اثرات سرعت جریان ورودی در ایجاد و افزایش شدت ناپایداری احتراق در شرایطی که دبی جرمی ورودی به محفظه سعی شده ثابت بماند، می‌باشد. در قسمت بعدی این تحقیق یک تحلیل تئوری انجام گرفته شده است که نتایج بدست آمده از این تحلیل تئوری با مقادیر تجربی بدست آمده مطابقت داشته و تائیدی برای همدیگر می‌باشند. نتایج بدست آمده از مقادیر اندازه گیری شده تجربی و محاسبات تئوری نشان می‌دهد که سرعت جریان ورودی پارامتر تاثیر گذاری بر ناپایداری احتراق در محفظه های احتراق پیش مخلوط می‌باشد، این نتایج همچنین نشان می‌دهد که در صورت ثابت در نظر گرفتن دبی جرمی ورودی، با افزایش سرعت جریان ورودی سیستم احتراقی تمایل به ناپایداری داشته بطوری که هرچه پارامتر سرعت جریان بیشتر شود دامنه و فرکانس نوسانات افزایش می‌یابد.

با توجه به مطالب گفته شده، با شناخت پارامترهای موثر بر ایجاد ناپایداری می‌توان با اعمال تغییراتی در آنها مانع از ایجاد ناپایداری احتراق در محفظه های پیش مخلوط شد، علاوه بر آن میتوان از اثرات این پارامترها و تاثیری که بر ناپایداری احتراق دارند جهت کنترل فعال در سیستم های احتراقی موتورهای توربین گازی استفاده نمود.

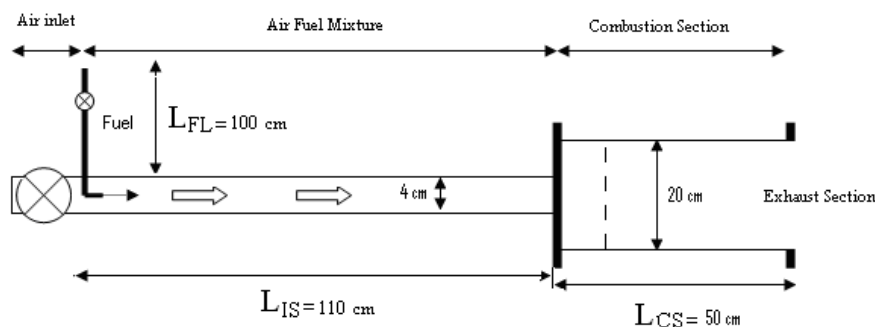
نوآوری کار انجام شده نسبت به مراجع [۱،۲،۴] این است که در مرجع [۱] صرفاً فرکانس های مودهای نوسانی در محفظه احتراق موتورهای توربین گازی بطور تجربی و تحلیلی مورد بررسی قرار گرفته شده است و در مرجع [۲] شبیه سازی ناپایداری احتراق توسط کد کامپیوتری نوشته شده توسط مولفین انجام گرفته شده است و در مرجع [۴] صرفاً اثر نسبت تعادل

¹ pressure fluctuations

بصورت تجربی مورد بررسی دقیق قرار گرفته ولی در این پژوهش حاضر، اثر سرعت مواد اولیه ورودی بصورت کاری آماری، از نتایج تجربی همراه با محاسبات تحلیلی، مورد بررسی قرار گرفته شده است که در کارهای قبلی به آن پرداخته نشده بود.

۲- دستگاه مورد آزمایش

برای انجام آزمایشات تجربی در محفظه‌های احتراق LPM لازم است که محفظه احتراقی از نوع پیش مخلوط مانند شکل (۲) طراحی و ساخته شود.



شکل ۲- شماتیک محفظه احتراق مورد آزمایش همراه با ابعاد آن

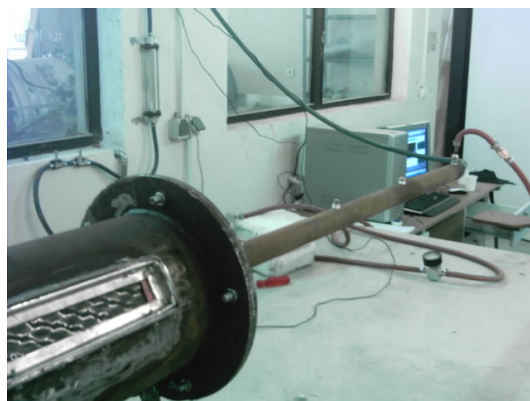
این دستگاه شامل اجزاء زیر می‌باشد:

۱. قسمت هوای ورودی
۲. قسمت اختلاط سوخت و هوا
۳. قسمت محفظه احتراق
۴. قسمت خروجی گازها سوخته شده

نحوه عملکرد این محفظه احتراق به این صورت است که ابتدا سوخت بطور شعاعی در مرکز لوله هوای ورودی پاشیده می‌شود. سپس در لوله ورودی (لوله پیش مخلوط) جریان سوخت و هوا بطور کامل با هم مخلوط می‌شوند. مخلوط سوخت و هوا وارد محفظه احتراق شده و احتراق در آن انجام می‌پذیرد.

نحوه عملکرد این محفظه احتراق به این صورت است که ابتدا سوخت بطور شعاعی در مرکز لوله هوای ورودی پاشیده می‌شود. سپس در لوله ورودی (لوله پیش مخلوط) جریان سوخت و هوا بطور کامل با هم مخلوط می‌شوند. مخلوط سوخت و هوا وارد محفظه احتراق شده و احتراق در آن انجام می‌پذیرد.

در هنگام تست آزمایشگاهی هوای متراکم شده از لوله ورودی وارد سیستم می‌شود. دمای هوای ورودی را می‌توان توسط یک هیتر (گرم کن) تنظیم کرد. در قسمت هوای ورودی شرایط طوری مهیا شده که طول لوله پیش مخلوط تغییر یابد و فاصله محل پاشش سوخت تا شعله قابل تنظیم باشد. بدین وسیله امکان بررسی تاثیر اندازه طول لوله ورودی پیش مخلوط در ناپایداری احتراق مهیا می‌گردد.



شکل ۳- محفظه احتراق پیش مخلوط مورد آزمایش

باید توجه کرد که دبی جرمی سوخت و هوای ورودی هیچگونه نوساناتی همراه خود به محفظه وارد نکند. علت آن این است که این نوسانات سوخت و هوا می‌تواند در فرکانس ناپایداری مشاهده شده تاثیر بگذارد. لذا برای این منظور در هنگام تزریق سوخت و هوا به لوله ورودی از نازل‌های استفاده شده که شرایط خفگی جریان را در ورودی ایجاد کند. به منظور امکان ایجاد مشاهده شعله در محفظه احتراق پنجره‌ای از جنس کواتز مهیا شده‌است، ضخامت شیشه کواتز انتخابی باید طوری باشد که توانایی تحمل فشار و دمای بالا را بخوبی داشته باشد.

مقدار دبی سوخت مصرفی توسط شیر مخصوصی، که از نوع جریان یکطرفه بوده و قابلیت تنظیم مقدار دبی عبوری با دقت زیاد را به محفظه احتراق دارد، کنترل می‌شود. علت انتخاب این نوع شیر در مسیر سوخت مصرفی، ایمنی بالای این نوع شیرها در مصارف احتراقی می‌باشد.

برای شروع آزمایش لازم است که ابتدا دستگاه گرم شود، سپس بعد از انجام تنظیمات اولیه ضروری است که دستگاه مدت زمانی کار کند تا به دمای پایدار برسد. سپس آزمایشات مورد نظر در رابطه با ناپایداری احتراق انجام گیرد. این دستگاه شامل وسایل اندازه‌گیری زیر می‌باشد:

- ۱- دبی سنج گازی، که برای اندازه‌گیری دبی سوخت و دبی هوای مصرفی استفاده می‌شود، محل‌های نصب این وسیله در لوله ورودی جریان هوا و سوخت به لوله پیش مخلوط می‌باشد.
- ۲- فشار سنج‌های معمولی، که محل‌های نصب آنها در روی لوله‌های سوخت و هوای ورودی به سیستم محفظه احتراق می‌باشد.
- ۳- میکروفون، که قابلیت اندازه‌گیری فشار دینامیکی آکوستیکی سیستم احتراقی و شدت صوت ایجاد شده را داشته باشد، این میکروفون در انتهای محفظه احتراق، محلی که گازهای سوخته شده از محفظه خارج می‌شوند، نصب می‌شود. لازم بذکر است که میکروفون طوری نصب شده که اولاً نوسانات سازه‌ای محفظه تاثیری بر آن نداشته باشد، ثانیاً در معرض مستقیم گازهای داغ خروجی قرار نگیرد. برای این منظور میکروفون توسط سیمی از سقف آزمایشگاه بطوری آویزان شده که این خاصیت‌های گفته شده لحاظ گردد.
- ۴- کارت داده برداری با سرعت انتقال داده برداری ۱۰ کیلو هرتز در ثانیه
- ۵- کامپیوتر برای پردازش اطلاعات
- ۶- نرم افزارهای مربوطه جهت پردازش اطلاعات
- ۷- ترموکوپل‌های جهت اندازه‌گیری دمای محفظه احتراق و هوای ورودی

پیش بینی شده است که این دستگاه قابلیت تغییر پارامترهای جریان از قبیل دما و دبی جرمی را داشته باشد. اضافه بر آن قابلیت تغییر ابعاد، جهت بررسی تاثیر ابعاد دستگاه، در ناپایداری نیز فراهم گردد. در این آزمایش از گاز پروپان به عنوان سوخت و از هوا به عنوان اکسید کننده استفاده شده است. فشار هوای ورودی در سیستم توسط کمپرسوری از نوع رفت و برگشتی مهیا می گردد. در هنگام آزمایش، فشار متوسط در نقاط نشان داده شده در شکل (۲) را می توان توسط فشار سنج معمولی اندازه گیری کرد. در هنگام آزمایش لازم است فشار مخزن کمپرسور ثابت بماند. برای اندازه گیری دبی سوخت و هوا از روماترگازی استفاده می شود. این دستگاهها می توانند دبی جرمی را با دقت تقریباً خوب تعیین کنند. علت استفاده از روماترگازی پایین بودن دبی جرمی سوخت و هوا مصرفی می باشد. شدت صوت ایجاد شده در اثر ناپایداری نیز توسط میکروفن اندازه گیری می شود. توسط این سیستم آزمایشگاهی، آزمایشات زیادی در رابطه با اثر دبی جرمی هوای ورودی همراه با تغییرات نسبت اختلاط سوخت و هوا و طول لوله پیش مخلوط بر ناپایداری احتراق انجام گرفته شده است.

۳- تحلیل تئوری ناپایداری احتراق

در این قسمت با توسعه روش شبیه سازی ناپایداری احتراق [۲] برای موتورهای توربین گازی پیش مخلوط فقیر LPM سعی شده است که اختلاف فاز نوسانات فشار و نوسانات حرارت آزاد شده تعیین گردد. کاربرد اصلی این شیوه در تعیین مرزهای ناپایداری در سیستم محفظه احتراق و تعیین فرکانس نوسانات می باشد. علاوه بر آن به کمک این مدل عوامل موثر بر فرایندهای احتراقی، از قبیل اثرات مستهلک شدن انرژی آکوستیکی در محفظه احتراق، اثرات جریان اصلی، شرایط مرزی سیستم و اثرات ناشی از نوسانات ϕ که از نوسانات جریان هوا و سوخت در جریان فرایند احتراق ناشی می شود، مورد بررسی قرار می گیرد.

در این کار تحلیلی فرضیات زیر در نظر گرفته شده است:

۱. گاز کامل و غیر لزج
 ۲. عدد ماخ متوسط جریان کم
 ۳. ضخامت شعله نسبت به طول موج نوسانات خیلی کوچک می باشد.
 ۴. میدانهای جریان متوسط در نواحی (I) و (III) یکنواخت و آیزنتروپیک هستند.
 ۵. میدانهای آکوستیکی در نواحی (I) و (III) یک بعدی فرض می شود.
- نوسانات آکوستیکی در نواحی (I)، (II) و (III) که در بردارنده بخش ورودی، ناحیه احتراق و محصولات احتراق می باشند به ترتیب با اندیس های IS، FL و CS در شکل ۲ مشخص شده اند. با ترکیب معادلات حاکم و فرضیات ارائه شده در بالا می توان معادله موج برای فشار آکوستیک را بصورت زیر بدست آورد:

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial}{\partial x}\right)^2 P' - \bar{c}^2 \frac{\partial^2 P'}{\partial x^2} = 0 \quad (1)$$

ترمهای \bar{c}^2 و \bar{u} بترتیب، مربع متوسط سرعت صوت و متوسط سرعت جریان ورودی به محفظه احتراق می باشند. با فرض نوسانات هارمونیک، میدان اغتشاشی سرعت (u') و نوسانات فشار آکوستیک (P') در هر ناحیه بفرم معادله (۲) بدست می آید:

$$P'_j = (D_j^+ e^{ik_j x / (1+M)} + D_j^- e^{-ik_j x / (1-M)}) e^{-i\omega t} \quad (2)$$

$$u_j' = \frac{1}{\rho_j c_j} (D_j^+ e^{ik_j x / (1+M)} - D_j^- e^{-ik_j x / (1-M)}) e^{-i\omega t} \quad (3)$$

در این روابط M عدد ماخ، $\bar{\rho}$ دانسیته متوسط و ضرائب D_j^\pm دامنه اغتشاشات آکوستیکی هستند که علامت آن جهت گسترده شده را نشان می‌دهد و اندیس j به ناحیه مورد نظر اشاره دارد. دامنه‌ها و فازهای این موجها را می‌توان با استفاده از شرایط مرزی و شرایط انطباقی (Matching) مناسب بدست آورد. بطور خلاصه این شرایط مرزی و شرایط انطباقی را می‌توان بصورت زیر بیان نمود [۴]:

۱. ۳ معادله برای شرایط مرزی بر اساس رابطه امیدانس

$$Z_{IS} = \frac{P'_{IS}}{u'_{IS}} \quad Z_{FL} = \frac{P'_{FL}}{u'_{FL}} \quad Z_{CS} = \frac{P'_{CS}}{u'_{CS}} \quad (4)$$

۲. ۱ معادله شرط انطباقی مومنوم برای دو طرف شعله

$$A_{CS}(P'_{CS} - P'_{IS}) + 2\bar{m}(u'_{CS} - u'_{IS}) = 0 \quad (5)$$

۳. ۱ معادله شرط انطباقی انرژی برای دو طرف شعله

$$A_{CS}(P_{CS} \bar{u}_{CS} + \bar{P}_{CS} u'_{CS}) - A_{IS}(P'_{IS} \bar{u}_{IS} + \bar{P}_{IS} u'_{IS}) = \frac{\gamma - 1}{\gamma} Q' \quad (6)$$

۴. ۱ معادله شرط انطباقی نوسانات سوخت و لوله هوای ورودی بر اساس معادله اویفیس

$$\frac{\dot{m}'_f}{\dot{m}_f} = \frac{\Delta P'_{or}}{2\Delta P_{or}} = \frac{P'_{FL} - P'_{IS}}{2\Delta P_{or}} \quad (7)$$

در معادله ۶ ترم نوسانات حرارت آزاد شده وارد میگردد که برای مدل سازی آن از مدل نوسانات نسبت تعادل بصورت زیر استفاده می‌شود:

$$\frac{Q'}{Q} = \kappa \zeta_2 \frac{\phi'}{\phi} \Big|_{\text{Flamebase}} e^{i\omega \tau_{\text{eff}}} \quad (8)$$

معادلات (۲) الی (۸) به دستگاه معادلاتی بصورت $AX=0$ ختم می‌شود که A ماتریس ضرایب می‌باشد. با حل این دستگاه معادلات بردار مجهولات X که شامل دامنه نوسانات در مناطق نشان داده شده در شکل ۲ می‌باشد، بدست می‌آید:

$$(D^+_{FL}, D^-_{FL}, D^+_{IS}, D^-_{IS}, D^+_{CS}, D^-_{CS}) \quad (9)$$

با مساوی صفر قرار دادن دترمینان دستگاه معادلات، مقادیر ویژه (فرکانس زاویه‌ای $\omega_n = \omega_{n,r} + i\omega_{n,i}$)، که ترمهای مختلط می‌باشند، براساس روش گرادیان^۱ بدست می‌آیند [۵]. قسمت حقیقی ترم ω_n ، فرکانس نوسانات و قسمت موهومی نرخ رشد نوسانات را نشان می‌دهند. مثبت بودن ترم موهومی بیان کننده این است که دامنه نوسانات در حال رشد می‌باشد و منفی بودن آن نشان دهنده میرا شدن نوسانات است [۶]. جدول (۱) مقادیر پارامترهای استفاده شده در این محاسبات را ارائه می‌کند. برای انجام محاسبات یک کد کامپیوتری توسط نرم افزار MATLAB تهیه گردیده تا بتوان مدلسازی را برای حالت مختلف انجام داد.

¹ Gradient method

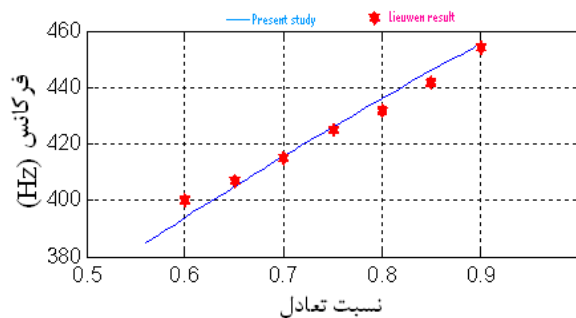
جدول ۱- پارامتر های استفاده شده در مطالعه تجربی و کد کامپیوتری

$\phi = 0.1 \sim 0.99$	$= 1$ فشار محفظه احتراق	atm	$T_{IS} = 300$ (K)
$L_{IS} = 5 \sim 110$ cm	$= 5 \sim 20$ سرعت مواد اولیه ورودی	m/s	$T_{product} = (T_{IS} + T_{WSR}) / 2$ (K)

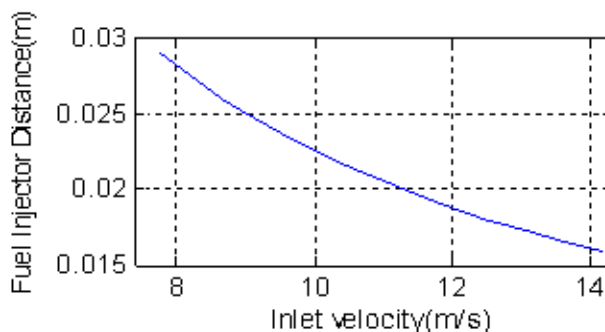
۴- نتایج تحلیلی

در این قسمت با استفاده از مدل نوسانات نسبت تعادل که در بخش قبل ارائه شد، تأثیر فاصله سوخت پاش، سرعت مواد اولیه ورودی و نسبت تعادل بر فرکانس ناپایداری بررسی شده است. برای این منظور داده‌های اولیه جهت انجام شبیه سازی ناپایداری احتراق بر اساس نوسانات نسبت تعادل در جدول (۱) ارائه شده است. سعی شده داده‌های انتخاب شده جهت شبیه سازی مطابق داده های نتایج تجربی در این کار پژوهشی باشد، تا نتایج تحلیلی بدست آورده شده در این پژوهش اعتباردهی گردد.

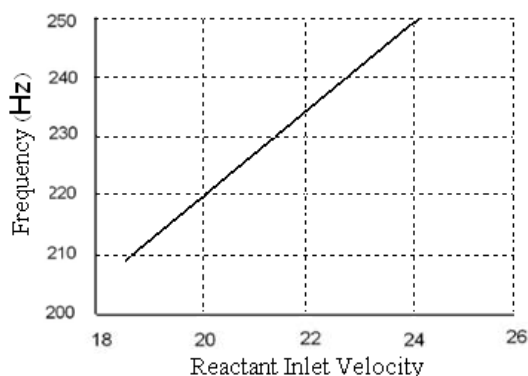
در نمودار (۴) رابطه بین نسبت تعادل سوخت به هوا با فرکانس تشدید در محفظه احتراق مورد بررسی قرار گرفته است. همان طور که در شکل مشخص است، با افزایش نسبت تعادل به سمت یک، فرکانس تشدید در محفظه احتراق، به حداکثر مقدار خودش یعنی حدود ۴۵۰ هرتز می‌رسد (خط ممتد در نمودار (۴)). این نمودار براساس داده‌های مدل شبیه سازی شده، با در نظر گرفتن حرارت آزاد شده ناپایا، تهیه شده است که با محاسبات انجام شده توسط لیوون (که در نمودار (۴) به صورت نقاط مشخص شده است) مقایسه گردیده است. همان طور که در شکل (۴) مشاهده می‌شود، محدوده افزایش فرکانس تشدید محفظه از حدود ۴۰۰ هرتز با نسبت تعادل سوخت به هوای ۰/۶ شروع شده و تا فرکانس تشدید حدود ۴۴۰ هرتز در نسبت تعادل ۰/۸۵ رسیده است، که نشان دهنده تطابق مناسب نتایج عددی به دست آمده، با مدل ریاضی لیوون [۷] می‌باشد. علت اینکه فقط این محدوده نسبت تعادل در این نمودار مورد مقایسه قرار گرفته شده است، این است که محدوده واقعی عملکردی، محدوده بیان شده بوده و خارج از این محدوده عملکردی احتیاجی به انجام محاسبات نبوده است.



شکل ۴- در این نمودار رابطه بین نسبت تعادل و فرکانس تشدید نشان داده شده است، نقاط نشان داده شده به صورت ستاره، محاسبات لیوون [۷] بوده و نتیجه بدست آمده در این مقاله با خط ممتد در نمودار نشان داده شده است

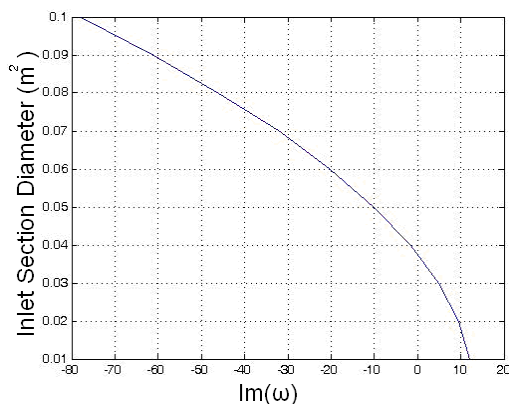


نمودار ۵- رابطه بین سرعت جریان ورودی و فاصله سوخت پاش تا شعله



شکل ۶- رابطه بین سرعت مواد اولیه ورودی به محفظه با فرکانس ناپایداری

نمودار (۵) رابطه بین فاصله سوخت پاش تا محل ایجاد شعله نسبت به سرعت جریان ورودی به محفظه احتراق، در هنگام ناپایداری نشان داده شده است. همان طور که در نمودار مشخص است، با افزایش سرعت جریان ورودی در هنگام ناپایداری فاصله سوخت پاش نیز کاهش یافته است. این نقاط محل‌هائی هستند که در آنها ترم موهومی ω عدد مثبت شده است، که نشان دهنده ناپایداری سیستم می‌باشد. با توجه به این نمودار مشخص است که در سرعت‌های ورودی کم باید فاصله سوخت پاش تا محفظه (L_{inj}) مقادیر بیشتری داشته باشد تا سیستم شرایط ناپایدار را حفظ کند. در نمودار (۶) ارتباط بین سرعت جریان ورودی در هنگام ناپایداری احتراق با فرکانس ناپایداری، نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود با افزایش سرعت مواد اولیه در جریان ورودی، فرکانس ناپایداری افزایش می‌یابد.

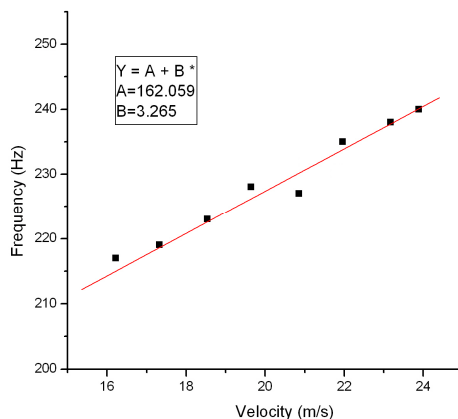


شکل ۷- رابطه بین سطح مقطع لوله ورودی به ناپایداری احتراق

در شکل (۷) تاثیر سطح مقطع لوله ورودی بر ناپایداری احتراق مورد بررسی قرار گرفته شده است. همانطور که نمودار نشان می دهد با افزایش سطح مقطع ورودی سیستم تمایل به پایداری دارد. با افزایش سطح مقطع جریان ورودی سرعت جریان کاهش یافته و از آنجایی که سرعت جریان ورودی رابطه مستقیم با دامنه نوسانات ایجاد شده دارد. لذا با کاهش سرعت جریان ورودی دامنه نوسانات نیز کاهش خواهد داشت. لذا در سیستم تمایل به پایداری ایجاد می شود

۵- تحلیل نتایج تجربی

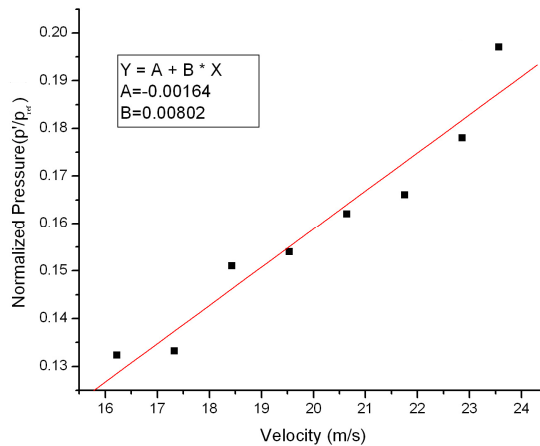
با توجه به تعاریف شرایط پایدار و ناپایدار که قبلا ارائه شد، در این قسمت وابستگی نوسانات فشاری ایجاد شده در محفظه احتراق (فرکانس و دامنه نوسانات فشاری) نسبت به سرعت جریان ورودی مورد بررسی قرار می گیرد. آزمایشهای انجام شده در این قسمت در بازه نسبت تعادل (ϕ) بین ۰/۷ الی ۱/۲ و فاصله نازل سوخت پاش تا محفظه بین ۴۰ الی ۱۱۰ سانتی متر می باشد. در این آزمایشات سعی شده است که دبی جرمی ثابت بوده و یا در غیر اینصورت تغییرات بسیار کوچکی داشته باشد. با توجه به نمودار (۸) و شیب مثبت نمودار سرعت و فرکانس می توان چنین نتیجه گرفت که نرخ تغییرات این دو در شرایط ناپایدار با یکدیگر به صورت خطی می باشد.



شکل ۸- رابطه بین سرعت متوسط جریان ورودی با فرکانس نوسانات ایجاد شده در هنگام ناپایداری احتراق

در شکل (۸) رابطه بین سرعت متوسط جریان جرمی ورودی به محفظه با فرکانس نوسانات ایجاد شده در هنگام ناپایداری احتراق نشان داده شده است. مقدار دبی جرمی عبوری به محفظه احتراق بدون تغییر می باشد. در این شرایط نسبت تعادل بین ۰/۷ الی ۱/۲ می باشد. شکل (۸) در شرایطی رسم شده که سوخت پاش در موقعیت اول قرار گرفته شده است. همان طور که مشخص است با افزایش سرعت جریان ورودی، فرکانس نوسانات ایجاد شده افزایش می یابد. نحوه افزایش فرکانس نوسانات با افزایش سرعت، به صورت معادله خطی $y = 162.059 + 3.262X$ می باشد. لذا رابطه بین سرعت جریان ورودی با فرکانس را می توان به صورت تناسب (۱۰) نشان داد. در این نمودار نقاط نشان داده شده، مقادیر بیشینه دامنه نوسانات در هر شرایط عملکردی هنگام ناپایداری احتراق می باشد. نقاط نشان داده شده در نمودار، مربوط به مود اول نوسانات فشاری است. از آنجایی که مهمترین پارامتر موثر بر فرکانس نوسانات ایجاد شده هندسه محفظه می باشد، لذا برای بررسی تأثیر سرعت ورودی هندسه محفظه تغییر داده نشده است.

$$f \propto \bar{u} \quad (10)$$



شکل ۹- رابطه بین سرعت متوسط جریان با دامنه نوسانات نوسانات

نمودار (۹) در شرایطی رسم شده که دبی جرمی کل ثابت در نظر گرفته شده است. در این شرایط دبی جرمی هوا را از ۱۱۶ لیتر بر دقیقه به ۱۵۲ لیتر بر دقیقه رسانده شده است. نسبت سوخت به هوا در این آزمایش بین ۰/۰۳۲ در شرایط فقیر، الی ۰/۰۴۸ در شرایط غنی می‌باشد. این نمودار نشان دهنده ارتباط بین سرعت جریان ورودی با دامنه نوسانات ایجاد شده در اثر ناپایداری احتراق می‌باشد. همان طور که در شکل نشان داده شد. با افزایش سرعت جریان ورودی دامنه نوسانات افزایش می‌یابد. این روند افزایش دامنه نوسانات تقریباً به صورت خطی می‌باشد.

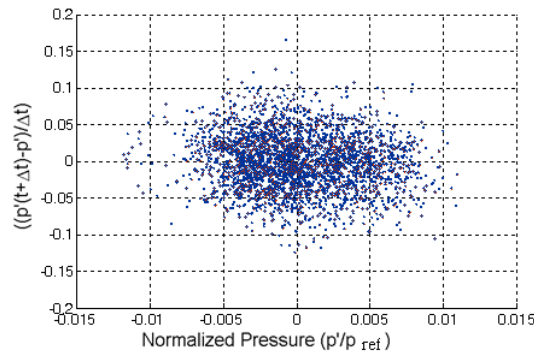
یکی دیگر از نتایج مهم بررسی داده‌های ثبت شده مربوط به وابستگی تغییرات بیشینه نوسانات فشار به سرعت جریان ورودی است. همان طور که در شکل (۹) نشان داده شده است افزایش سرعت جریان ورودی عامل موثری بر رشد دامنه نوسانات فشاری می‌باشد.

$$\bar{u} \propto \frac{p'}{p_{ref}} \quad (11)$$

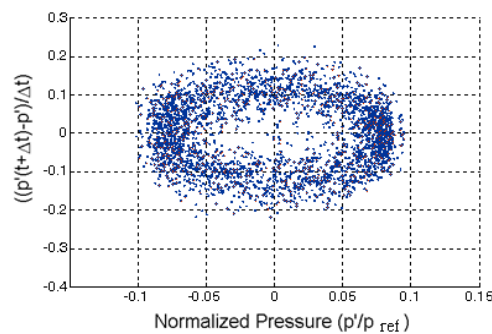
بنابراین اعمال تغییر در سرعت جریان ورودی تأثیر بسزائی در تغییر فرکانس و دامنه نوسانات ناپایدار دارد. با مقایسه شکل‌های (۸) و (۹) مشخص می‌شود که با افزایش سرعت جریان ورودی به محفظه، فرکانس و دامنه نوسانات افزایش می‌یابد. با استناد به تناسب (۱۰) و تناسب (۱۱) چنین نتیجه‌گیری می‌شود که تغییرات فرکانس، سرعت و دامنه نوسانات فشار با یکدیگر متناسب هستند (تناسب (۱۲)).

همان طور که ملاحظه شد در دبی جرمی تقریباً ثابت افزایش سرعت جریان ورودی باعث افزایش فرکانس و دامنه نوسانات فشاری می‌گردد. در ادامه تأثیر سرعت جریان ورودی بر نمودارهای توزیع فضائی و تابع چگالی احتمال نمایش داده شده است. در اشکال (۱۰)، (۱۱)، (۱۲)، (۱۳) و (۱۴) نحوه اثر افزایش سرعت جریان ورودی بر دامنه نوسانات و شکل نمودار توزیع فضائی نشان داده شده است. همان طور که مشخص است با افزایش سرعت جریان ورودی قطر بیضوی نمودار افزایش می‌یابد.

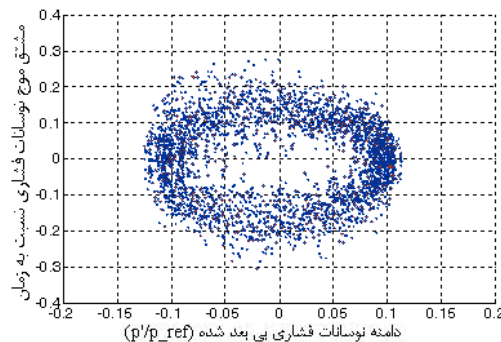
$$f \propto \bar{u} \propto \frac{p'}{p_{ref}} \quad (12)$$



شکل ۱۰- اثر افزایش سرعت جریان مواد واکنش دهنده بر نمودار توزیع فضائی برای $\bar{u} = 16m/s$

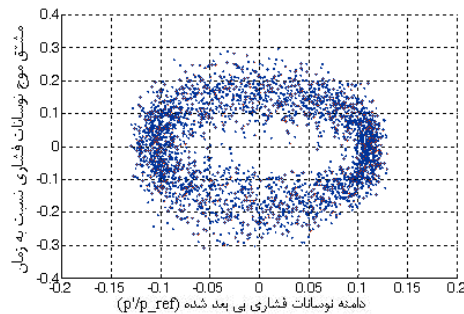


شکل ۱۱- اثر افزایش سرعت جریان مواد واکنش دهنده بر نمودار توزیع فضائی برای $\bar{u} = 17.5m/s$

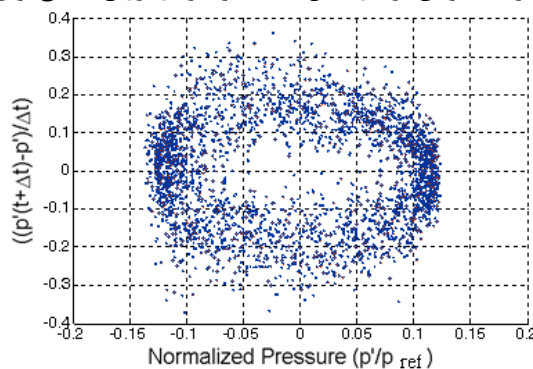


شکل ۱۲ اثر افزایش سرعت جریان مواد واکنش دهنده بر نمودار توزیع فضائی برای $\bar{u} = 18.5m/s$

بنابراین با افزایش سرعت جریان ورودی از مقدار ۱۶ متر بر ثانیه تا ۲۱ متر بر ثانیه نقاط نمونه برداری شده از مبداء فاصله گرفته و بشکل بیضوی تبدیل می‌شوند. شکل (۱۰) نمایش دهنده حالت پایدار محفظه احتراق بوده و میانگین دامنه آن در حدود ۰/۰۰۷ نسبت به فشار رفرنس می‌باشد. با افزایش سرعت جریان تا ۱۷/۵ متر بر ثانیه نقاط نمونه برداری شده از مبداء مختصات فاصله گرفته و دامنه اغتشاشات در آن به حدود ۰/۰۷۵ میرسد (شکل (۱۱)). به همین صورت با افزایش سرعت تا ۱۸/۵ متر بر ثانیه دامنه نوسانات فشاری افزایش یافته و مدار بیضوی ساخته شده نیز رشد می‌کند (شکل (۱۲)). مقدار دامنه نوسانات فشاری در این حالت تا مرز ۰/۱ نسبت به فشار رفرنس افزایش می‌یابد. با افزایش سرعت مشاهده می‌شود که دامنه نوسانات روند رو به رشدی را طی می‌کند. ولی با افزایش سرعت از ۱۹ متر به بالاتر دامنه نوسانات دیگر رشد نمی‌کند که در این حالت سیستم به حالت اشباع رسیده است (شکل‌های (۱۴)، (۱۳)). فرآیند افزایش سرعت جریان ورودی تأثیر مشابهی بر روی تابع چگالی احتمال دارد که در ادامه به آن پرداخته می‌شود. لازم به ذکر است که نمودارهای چگالی احتمال که در ادامه ارائه خواهد شد. در شرایط عملکردی یکسانی با نمودارهای توزیع فضائی ارائه شده در قسمت قبلی می‌باشد.

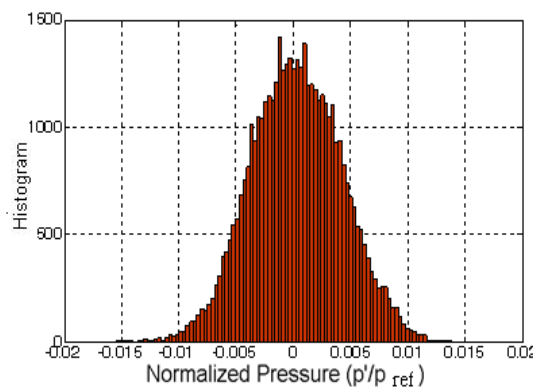


شکل ۱۳- اثر افزایش سرعت جریان مواد واکنش دهنده بر نمودار توزیع فضائی برای $\bar{u} = 19.5 m/s$



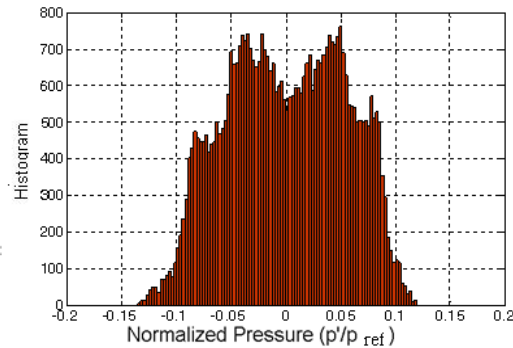
شکل ۱۴- اثر افزایش سرعت جریان مواد واکنش دهنده بر نمودار توزیع فضائی برای $\bar{u} = 21 m/s$

شکل (۱۵) شرایط پایدار محفظه احتراق را نشان می دهد. همانطور که مشخص است توزیع تعداد تکرار دامنه نوسانات بصورت توزیع گوس می باشد. با افزایش سرعت جریان ورودی توزیع گوس اشاره شده در نمودار (۱۵) از بین رفته و در این حالت سیستم محفظه احتراقی شرایط انتقال از حالت پایدار به حالت ناپایدار را سپری می کند (شکل(۱۶). در این آزمایشات همزمان با افزایش سرعت جریان دبی جرمی جریان نیز افزایش یافته است. با افزایش سرعت جریان ورودی به محفظه احتراق دامنه بیشترین تکرار افزایش یافته و در شکل (۱۷) از ۰/۹ به ۱/۱ در شکل (۱۸) می رسد.

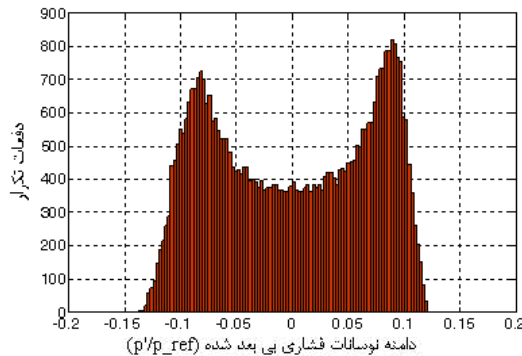


شکل ۱۵- اثر افزایش سرعت جریان مواد واکنش دهنده بر نمودار تابع چگالی برای $\bar{u} = 16 m/s$

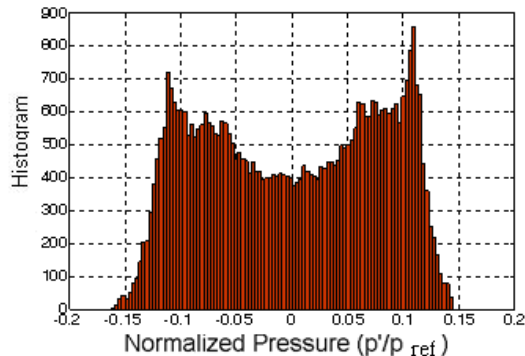
نمودارهای (۱۵)، (۱۶)، (۱۷) و (۱۸) ارائه شده نشان دهنده رشد دامنه نوسانات فشاری با افزایش سرعت جریان ورودی می- باشد. در میان نمودارهای ارائه شده شکل (۱۶) نشان دهنده شرایط انتقال از حالت پایدار به ناپایدار بوده که باعث بوجود آمدن دو بیشینه فشاری در محفظه احتراق شده است.



شکل ۱۶- اثر افزایش سرعت جریان مواد واکنش دهنده بر نمودار تابع چگالی برای $\bar{u} = 17.5 \text{ m/s}$



شکل ۱۷- اثر افزایش سرعت جریان مواد واکنش دهنده بر نمودار تابع چگالی برای $\bar{u} = 18.5 \text{ m/s}$



شکل ۱۸- اثر افزایش سرعت جریان مواد واکنش دهنده بر نمودار تابع چگالی برای $\bar{u} = 21 \text{ m/s}$

۹- نتیجه گیری

- با توجه به مدل شبیه سازی ناپایداری احتراق پیش مخلوط انجام شده همراه با نتایج تجربی بدست آمده از قسمت تجربی این پژوهش در شرایط فقیر سوخت به هوا می توان نتایج زیر را بدست آورد:
- با کاهش فاصله سوخت پاش، سیستم تمایل به پایدار شدن پیدا میکند.
- در هنگام پایداری احتراق نمودار هیستوگرام فقط دارای یک قله می باشد.
 - در صورت ثابت در نظر گرفتن دبی جرمی مواد اولیه با افزایش سرعت جریان ورودی دامنه نوسانات فشاری به صورت خطی افزایش می یابد.



FCCI2010-1180

سومین کنفرانس سوخت و احتراق ایران

تهران - دانشگاه صنعتی امیرکبیر - اسفند ماه ۱۳۸۸



دانشگاه صنعتی امیرکبیر
دانشکده مهندسی هوافضا

- در هنگام پایداری اکثر نقاط نمونه برداری شده در نمودار توزیع فضایی و نمودار هیستوگرام روی نقطه مبدا قرار گرفته اند و با ورود به محدوده ناپایداری، انبوه نقاط نمونه برداری شده از مبدا فاصله می گیرند.
- فرکانس ناپایداری احتراق معادل با فرکانس تشدید آکوستیکی در محفظه احتراق است، اما هر فرکانس تشدید، فرکانس ناپایداری نمی باشد.
- برای ناپایدار ماندن محفظه احتراق با افزایش سرعت مواد اولیه ورودی به محفظه در دبی ثابت، میتوان فاصله سوخت پاش را کاهش داد تا سیستم در حالت ناپایدار باقی بماند.

مراجع

- 1- Akbari, N, Mehdizadeh, N S, and Ebrahimi; R. "Analytical of Experimental Investigation of Frequency of Oscillation Modes in Combustion Chambers of Gas turbine", Journal of Aerospace Engineering, Vol.223, No. G6, pp 741-747 September, 2009.
- 2- Akbari, N, Mehdizadeh, N S; R "Thermo-Acoustic Instability Simulation in Gas Turbine", Journal of Mechanics, Vol.25, No.4, pp. 279-289 December, 2009.
- 3- You, D. "A Three-Dimensional Linear Acoustic Analysis of Gas-Turbine Combustion Instability", Thesis, Pennsylvania State University, 2004.
- 4- Akbari, N, Mehdizadeh, N S, and Ebrahimi "Experimental Study of Equivalence Ratio Influence on Thermo-acoustic Instability in Gas Turbines" Int. Symp. on Heat Transfer in Gas Turbine Systems 9-14 August, 2009, Antalya, Turkey
- 5- Hoffman, J. D. "Numerical Methods for Engineers and Scientists", McGraw-Hill, Inc. New York.
- ۶- اکبری، ن، سراج مهدیزاده، ن، ابراهیمی، ر. "مطالعه تجربی ناپایداری احتراق در محفظه‌های پیش مخلوط موتور توربین گازی" نشریه علمی پژوهشی مکانیک و هوا فضا، جلد ۴، شماره ۴، ص ص. ۱-۱۳، زمستان، ۱۳۷۸
- 7- Lieuwen T.; "Experimental Investigation of Combustion Instability in a Gas Turbine Combustor Simulator", Journal of Propulsion and Power, AIAA-99-0712, 1999